aci avances en ciencias e ingenierías

Artículo/Article
Vol. 17, nro. 1
e3299

Hacia una agricultura resiliente al cambio climático: sistemas de riego inteligente y monitoreo de humedad del suelo para cultivos en la zona andina

Juan Sebastián Rhor[1]*, Dennis Cazar-Ramirez[2],

[1]Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Departamento de Electrónica, Quito, Ecuador.

[2]Universidad San Francisco de Quito USFQ, Colegio de Ciencias e Ingenierías, Laboratorio de Detección de Partículas, Astropartículas y Radiaciones LEOPARD, Quito, Ecuador.

*Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: jrhor@estud.usfq.edu.ec

Toward climate-resilient agriculture: smart irrigation systems and soil moisture monitoring for crops in the Andean Region

Resumen

El cambio climático y el calentamiento global plantean desafíos significativos para la agricultura, especialmente en un mundo cada vez más interconectado y dependiente de productos básicos. El presente trabajo analiza las implicaciones del cambio climático en la agricultura, centrándose en la zona andina de América Latina, con un énfasis particular en Ecuador. Se discuten los efectos del cambio climático en la producción agrícola, la disponibilidad de recursos hídricos y las posibles soluciones tecnológicas. Se examinan investigaciones que demuestran tanto los efectos positivos como negativos del cambio climático en la agricultura, y se resalta la importancia de encontrar soluciones tecnológicas para mitigar estos impactos. Se enfatiza la necesidad de mejorar la productividad agrícola y la eficiencia en el uso del agua, especialmente en regiones vulnerables al cambio climático como son los andes ecuatorianos. Este trabajo propone el desarrollo de sistemas de riego inteligente basados en tecnologías innovadoras, como la detección de neutrones cósmicos, para monitorear la humedad del suelo de manera precisa y en tiempo real. Se destaca la importancia de implementar estas tecnologías en la región para mejorar la productividad agrícola, prevenir crisis alimentarias y adaptarse al cambio climático. Se concluye resaltando la necesidad de colaboración entre instituciones de investigación y formuladores de políticas para abordar estos desafíos de manera efectiva y sostenible.

Palabras clave: cambio climático, calentamiento global, recursos hídricos, agricultura de precisión, estimación de la humedad del suelo, detección de neutrones cósmicos.

Abstract

Climate change and global warming pose significant challenges for agriculture, especially in an increasingly interconnected world reliant on basic commodities. This paper examines the implications of climate change on agriculture, focusing on the Andean region of Latin America, with particular emphasis on Ecuador. The effects of climate change on agricultural production, water resource availability, and potential technological solutions are discussed. Research demonstrating both the positive and negative effects of climate change on agriculture is examined, underscoring the





Editado por / Edited by: Edgar Carrera Jarrín

Recibido / Received: 26/08/2024

Aceptado / Accepted: 23/01/2025

Publicado en línea / Published online: 14/05/2025



importance of finding technological solutions to mitigate these impacts. The need to improve agricultural productivity and water use efficiency, particularly in climate change-vulnerable regions such as the Ecuadorian Andes, is emphasized. This paper proposes the development of intelligent irrigation systems based on innovative technologies, such as cosmic neutron detection, to precisely and in real-time monitor soil moisture. The importance of implementing these technologies in the region to enhance agricultural productivity, prevent food crises, and adapt to climate change is highlighted. The conclusion emphasizes the necessity of collaboration between research institutions and policymakers to effectively and sustainably address these challenges.

Keywords: climate change, global warming, water resources, precision Agriculture, soil moisture estimation, cosmic ray neutron detection

INTRODUCCIÓN

El cambio climático como consecuencia del calentamiento global es un aspecto crítico. Su impacto es tal que influye dentro de una sociedad cada vez más interconectada, globalizada y sobre todo dependiente en lo que se refiere a productos básicos para nuestra supervivencia, como son la producción de energía y de alimentos. En lo que se refiere a la producción de alimentos, la prevalencia y bienestar de los agricultores resultan temas de preocupación tanto para la comunidad científica como para los ambientes sociopolíticos, al referirse a una de nuestras fuentes de alimentos principales a nivel mundial.

De esta manera, el enfoque de este trabajo nace a partir de una exploración que busca, en principio y de manera general, determinar la magnitud de los riesgos y amenazas que representan las consecuencias del cambio climático en la agricultura y analizar cómo la ciencia y la tecnología pueden ayudar a mitigar sus consecuencias.

De acuerdo con una publicación en el *European Journal of Agronomy*, dedicada al análisis de las posibles consecuencias del cambio climático dentro de las zonas agricultoras en Europa [1], se afirma que existirán efectos tanto positivos como negativos dependiendo de la zona. En el norte del continente se espera un incremento en las zonas aptas para la actividad agrícola y en el número de especies emergentes para el cultivo, pero se teme que la precipitación extrema y las características del suelo conduzcan a una mayor fragilidad de la cosecha al momento del crecimiento. Por el contrario, se pronostica que las zonas del sur experimentarán una pérdida de zonas aptas para el cultivo debido a la escasez de agua y a los eventos de climas extremos.

De esta manera se puede concluir que, aunque los efectos del cambio climático dentro de las zonas agrícolas no sean desalentadores de manera unánime, se debe considerar el riesgo de una pérdida creciente de zonas de cultivo, cuyo impacto sobre la cadena de suministro de alimentos será capaz de provocar crisis económicas y sociales que afecten a la población.

Gracias a la creación de un modelo econométrico específico para determinar la influencia del cambio climático de origen antropogénico en la productividad agrícola [2] se determinó que este fenómeno ha provocado una reducción en la producción agrícola



de un 21 % a nivel global desde 1 961 y entre un 26 % a un 34 % en regiones más cálidas como lo son gran parte de África, América Latina y el Caribe.

A partir de este análisis se puede determinar la severidad del impacto del cambio climático dentro del medio y de la capacidad de este fenómeno de convertirse en una amenaza para el *status quo* de nuestra sociedad. Además, resulta una gran preocupación que la región andina y el Ecuador en particular, se encuentren en primera línea con respecto a la necesidad de métodos y soluciones que logren mitigar los efectos del cambio climático para preservar las zonas agrícolas en actividad.

Esta situación se vuelve más urgente al considerar que, de acuerdo con el *Regional Strategic Profile for Latin America and the Caribbean* (RSP) 2016-2021 [3], hacia el año 2050, América Latina representará aproximadamente el 60 % de la demanda mundial de alimentos. El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura señala que la productividad agrícola debe aumentar en un 1.75 % anual para satisfacer las necesidades alimentarias proyectadas para el mundo en 2050.

USO DE RECURSOS HÍDRICOS

El contexto actual desfavorece con gravedad a las actividades agrícolas en el continente. A la vez que se exige una mejora de productividad para satisfacer las proyecciones del aumento poblacional, los efectos del cambio climático incrementan la brecha entre los resultados de abastecimiento esperados y la capacidad actual de las zonas destinadas a la producción de alimentos. A raíz de esto, resulta imperativo encontrar alternativas o métodos que generen un incremento importante de la productividad agrícola. Dentro de todas las posibilidades a valorar, se ha identificado el manejo y optimización de los recursos hídricos como la estrategia más beneficiosa para el contexto regional.

De acuerdo con una investigación publicada en la revista *Environmental and Experimental Botany* [4], los países en vías de desarrollo presentan dificultades para cubrir los gastos de investigaciones complejas que puedan mejorar la productividad agrícola, tales como las dedicadas al estrés por sequía. De esta manera, consideraron que la mejor alternativa para incrementar la producción o mejorar su calidad a un bajo costo sería a partir de un mejor manejo de los recursos de abastecimiento de agua. Para algunas regiones, se sostiene que el enfoque más directo implica renunciar a depender exclusivamente de las fuentes de lluvia para la irrigación y ,en su lugar, adoptar otro tipo de sistemas de riego.

Partiendo de esta investigación, la atención se centró en los sistemas de irrigación como un método prometedor para la optimización de los recursos hídricos. Existen varias publicaciones que comparten esta visión y han obtenido resultados alentadores al realizar contrastes con otros métodos de irrigación más tradicionales. Una de ellas se publicó en la revista de *Hydrology and Earth System Sciences* [5], donde los autores comparan diversas técnicas de riego (surcos, aspersión, goteo y goteo subsuperficial) y concluyen que los métodos de goteo y riego subsuperficial presentan las mayores reducciones en el consumo de agua al enfocarse en la zona radicular y minimizar la evaporación superficial. Más allá, una publicación realizada por la *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo* [6] compara los métodos de riego por gravedad, goteo y aspersión para el cultivo de maíz, con la conclusión de que "el tratamiento con mayor

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



eficiencia de aplicación fue el riego por goteo (T2) con 96 %; esta eficiencia influyó significativamente en el rendimiento por categoría del cultivo de maíz".

Para continuar con la investigación inicial, los autores concluyeron que la prevalencia de la lluvia como fuente principal de irrigación es justificable cuando resulta ser el único método disponible para asegurar la supervivencia de la cosecha. Con la irrigación por lluvia se sacrifica el crecimiento máximo del cultivo, lo cual se podría lograr a partir de un manejo óptimo del suministro de agua con un sistema de irrigación inteligente. También reiteran que la producción óptima de alimentos obtenida gracias a este método ayuda a prevenir una mayor extensión de la frontera agrícola, debido a que se lograría responder a los incrementos de demanda como producto del aumento poblacional. Esta es una de las características mejor valoradas dentro del plan de optimización, pues la permanencia de los espacios naturales es de vital importancia para contraatacar al calentamiento global, lo que a su vez lograría proteger a las zonas agrícolas establecidas de mayores riesgos ambientales.

En esta línea, otra investigación publicada en el *Journal Frontiers* [7] reporta que la adopción de sistemas de micro-irrigación es útil tanto para reducir la evaporación del agua del suelo entre las filas de plantas de la cosecha, como para limitar la evaporación alrededor del dosel de las plantas casi en su totalidad. A partir de ello validaron estos sistemas como métodos para mejorar la Eficiencia del Uso del Agua (WUE). La obtención de una mejora en el WUE resulta sumamente importante, dado que este parámetro tiene una estrecha relación con respecto a productividad y calidad de los cultivos.

Por otra parte, y a pesar de los buenos resultados reportados, la realidad global es que el desarrollo de los sistemas de irrigación no ha alcanzado su punto óptimo. A partir de una exploración más extensa realizada por la UNESCO [8] se encontró que, de acuerdo con el reporte de las Naciones Unidas sobre el programa del desarrollo del agua, aproximadamente el 69 % del suministro mundial de agua dulce se destina a la agricultura, particularmente a la irrigación, con menos del 50 % de eficiencia en su utilización. Se reporta también que el 20 % de la tierra dedicada a la agricultura alrededor del mundo es suministrada de agua a partir de sistemas de irrigación, y a pesar de ello produce alrededor del 40 % de los alimentos [8].

A partir de estas cifras se puede notar que existe un enorme margen de mejora en lo que se refiere al manejo y distribución del agua para los sistemas de irrigación dentro de las zonas agrícolas y la producción neta de alimentos. De esta manera, la investigación en la optimización del uso del agua a partir de sistemas de irrigación más sofisticados no es solamente una forma de mejorar la producción agrícola sino una estrategia para lograr un uso responsable de este recurso y permitir una mejor distribución que beneficie tanto a las áreas dedicadas a la agricultura como a diferentes sectores de nuestra sociedad.

ENFOQUE DE LA REVISIÓN

El contexto hídrico de las zonas agrícolas ecuatorianas

La realidad de la agricultura ecuatoriana está muy alejada de cumplir con las necesidades actuales que se exhiben dentro del manejo de sus recursos hídricos para abastecer los

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



terrenos agrícolas del país. De acuerdo con una investigación realizada a nivel nacional entre el 2017 y 2018, se estimó que "el 21,1 % de la superficie cultivada del Ecuador se regó" [9]. Este contexto está afectando severamente a varios productos fundamentales para la economía de exportación y abastecimiento del país. Dentro de los más preocupantes, se observa que para el 2018, alrededor del 77.5 % de la tierra dedicada al cacao, el 28.7 % para el arroz y el 62.3 % para la papa no fueron regadas [9].

Más allá, las técnicas de riego utilizadas por los grandes y pequeños agricultores presentan un atraso considerable en términos de tecnología y optimización, de manera que los métodos tradicionales siguen siendo vigentes a pesar de sus claras desventajas. Se observa que para el 2018, solo el 39.7 % de la tierra bajo riego estuvo mantenida por un sistema de aspersión para cultivos permanentes, siendo reducido a un 13.6 % para zonas de cultivos transitorios.

En contraste, el método de surcos-inundación sigue siendo ampliamente utilizado en el país para regar el 32.6 % de la tierra dedicada a cultivos permanentes y hasta el 79.7 % para cultivos transitorios [9]. En otra investigación realizada por el Banco Mundial en 2021, se encontró que en Ecuador, "de las 338 mil hectáreas en manos de los pequeños y medianos productores que cuentan con riego, el 93 % aún utilizan métodos de irrigación tradicionales, con niveles de eficiencia reducida y una limitada capacidad de almacenamiento de agua" [10].

A raíz de esta situación, se ha buscado alternativas que puedan favorecer la producción agrícola, optimizando los recursos disponibles y limitando los costos de aplicación. Existen algunos proyectos, llevados a cabo en su mayoría con el apoyo de organizaciones gubernamentales y sin fines de lucro, donde los resultados han sido prometedores.

Uno de ellos es el Proyecto De Irrigación Tecnificada Para Pequeños y Medianos Productores y Productoras, implementado por el Ministerio de Agricultura y con financiamiento del Banco Mundial y la Agencia Española de Cooperación para el Desarrollo (AECID) [8]. Con el objetivo de ayudar a los pequeños y grandes agricultores, se obtuvo que los campesinos incluidos en el programa lograron no solamente un incremento dentro de sus ingresos (que se reportó alrededor del 60 %), sino un aumento de productividad de la tierra y una minimización del impacto de las condiciones climáticas dentro de la integridad y capacidad de las cosechas en ciertas épocas del año.

No obstante, el proceso de renovación y adaptación de las zonas agrícolas en el país hacia métodos de riego más eficientes aún tiene un gran camino por recorrer. De esta manera, se encuentra una gran oportunidad de investigación y desarrollo de tecnología para nuestra realidad geográfica, climática y social con el fin de mejorar la calidad, capacidad de producción y permanencia de nuestras fuentes de alimentos en un contexto de desabastecimiento, calentamiento global y un constante aumento de necesidades alimenticias tanto local como globalmente.

Sistemas de riego inteligentes

Un sistema de riego inteligente es una solución tecnológica integral que automatiza y optimiza el riego agrícola mediante el uso de sensores para monitorear las condiciones

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



del suelo y el clima, actuadores para gestionar diferentes métodos de riego, y algoritmos avanzados de machine learning e inteligencia artificial para el procesamiento y análisis de datos. Este sistema busca maximizar la eficiencia del uso del agua, mejorar el rendimiento de los cultivos y reducir el desperdicio, adaptándose dinámicamente a las necesidades específicas del cultivo y las condiciones ambientales cambiantes.

Un sistema de riego inteligente está compuesto por 3 sistemas principales. El primero se basa en la medición de variables ambientales (temperatura, presión atmosférica, irradiancia solar, entre otras) y parámetros específicos del suelo (humedad, porosidad, densidad, entre otros). El segundo es una unidad de procesamiento de datos capaz de determinar el modo óptimo de irrigar los cultivos determinando la cantidad de agua, la profundidad y la cadencia del riego. El tercero se encarga de la irrigación de suelo programado en tiempo real usando sistemas de aspersión, goteo u otros disponibles.

En este artículo nos centraremos en los sistemas de medición de humedad del suelo, en particular el uso de nuevas tecnologías basadas en la determinación de la humedad del suelo mediante la detección de neutrones cósmicos.

En la actualidad, los métodos de determinación del nivel de humedad del suelo y la atmósfera para grandes extensiones de terreno se pueden clasificar en dos grupos:

Técnicas basadas en el escaneo satelital: el uso de imágenes satelitales para estimar la humedad del suelo fue el primer candidato para generar un mapa global de humedad en el planeta, siendo un ejemplo el Soil Moisture Active Passive SMAP de la NASA [11]. Se están desarrollando técnicas basadas en el análisis hiperespectral de imágenes satelitales para determinar el tipo de suelo e inferir su nivel de humedad [12]. El aspecto positivo de esta técnica es la disponibilidad de imágenes satelitales de grandes extensiones en el tiempo; no obstante, su escasa resolución horizontal, poca resolución en profundidad y alto costo no la hacen una técnica utilizable en nuestra región, especialmente para agricultores que manejan pequeñas áreas de cultivo. Además, esta iniciativa no está especializada en agricultura, dado que la escala de la recopilación de información no se puede adecuar para mediciones en áreas específicas de cultivos (menos de una hectárea) donde, para la aplicación de interés, se necesita contar con un monitoreo constante de la humedad del terreno.

Redes de sensores de humedad: el segundo grupo engloba a las redes de sensores de humedad. Aunque existen diversos tipos de acuerdo con el presupuesto y capacidad esperada de la red, nuestro enfoque apunta a las que están compuestas por sensores de alta resolución espacial, tales como las iniciativas de COSMOS-US y COSMO-UK [13], las cuales determinan la abundancia de los neutrones térmicos utilizando detectores gaseosos (como los de Helio-3), para retornar mediciones de gran precisión. No obstante, estas redes son costosas y difíciles de implementar, ya que los gases utilizados son derivados de la producción de energía nuclear.

Además, la escala de estas redes no suele considerar a regiones en vías de desarrollo. Un ejemplo se encuentra en la siguiente figura, la cual muestra la localización de sensores de la red COSMOS. Nótese que tanto en Centroamérica y Sudamérica (a excepción de Brasil), como en gran parte de África, no existen sensores instalados (Figura 1).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



TABLA 1. Elenco de los detectores CRND de la red COSMOS en el mundo detallados por país, incluyendo la cobertura y su estado de funcionamiento.

País	Nro. De detectores (aproximado)	Estado	Alcance (m de radio)
EE.UU.	500	Activo	240
Reino Unido	50	Activo	200
Alemania	20	Activo	250
China	10	Parcial	200
Vietnam	3	Prueba (Plan piloto)	150 – 180
Italia	3 - 5	Experimental	200
Francia	5	Activo	240
España	3 - 4	Prueba	200
Dinamarca	2 - 3	Activo	200
Brasil	2	Prueba	N.D.

Un contraste de ambas alternativas nos permitió reconocer sus ventajas y desventajas individuales. Gracias a ello logramos justificar a la red de sensores como la alternativa que mejor podría ajustarse para la implementación de un sistema de riego de monitoreo en la región (Tabla 2).

TABLA 2. Comparación de los principales aspectos de los sistemas de detección del nivel de humedad en el suelo.

Características	Escaneo satelital	Redes de sensores
Resolución	Baja	Alta
Cobertura	Alta (km)	Moderada (hm)
Acceso a datos crudos	NO	NO
Datos de la región	Parciales	Nulos
Costos	Alto (MUSD)	Moderado (KUSD)

El detector de rayos cósmicos y su abanico de posibilidades.

El uso de técnicas derivadas de la Física Nuclear y la Física de Altas Energías, como son la Detección de Neutrones provenientes de Rayos Cósmicos (CRND), pueden brindar una solución eficiente y económica para realizar un monitoreo constante y preciso del nivel de humedad de grandes extensiones de terreno.

Los neutrones provenientes de los rayos cósmicos son moderados por el hidrógeno presente en el suelo, y en los cultivos. Estos presentan una anti-correlación entre el conteo de neutrones térmicos (con energía cinética de eV~MeV) y la humedad local del suelo [14] La Figura 1 muestra la diferencia de abundancia de neutrones para dos muestras de suelo con diversos niveles de humedad.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299

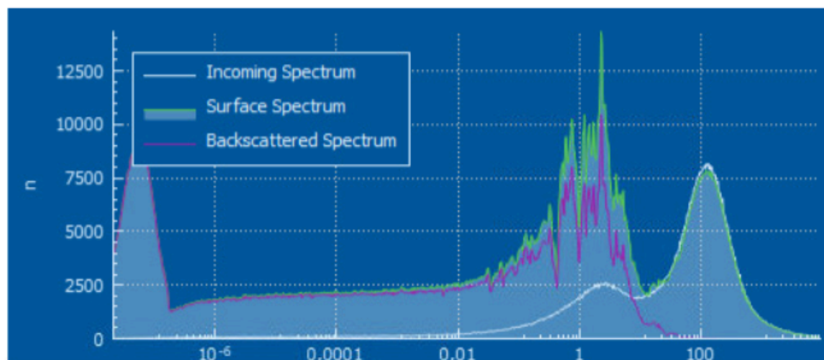


Figura 1 A

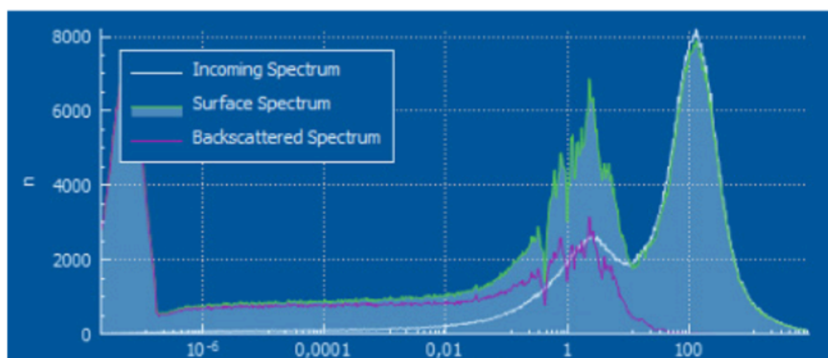


Figura 1 B

FIGURA 1. **Espectros de energía de neutrones cósmicos realizadas con dos niveles de humedad relativa del suelo: suelo seco 6 % (a) y suelo húmedo 40 % (b) se evidencia una diferencia del 40 % en abundancia de neutrones epitermales (energía entre 10-6 y 10-4 MeVs), simulaciones realizadas con URANUS** [15].

La CRN se ha consolidado como un método de monitoreo bien establecido que proporciona el Contenido Volumétrico de Agua (VWC) medio del suelo en 1 hectárea aproximadamente. Las redes de monitoreo de humedad COSMOS-US y COSMOS-UK demuestran la efectividad de esta técnica para el monitoreo a largo plazo de las condiciones hidrológicas de grandes extensiones.

A partir de estos detectores se pueden desarrollar sistemas para optimizar los procesos de irrigación y almacenamiento de agua dentro de los cultivos. Además, la información recopilada por los detectores CRND puede servir como complemento para otras técnicas de monitoreo de humedad del suelo. En combinación con la información proporcionada por satélites, sondas y análisis químicos, es posible desarrollar sistemas para calibrar los datos extrapolados de imágenes satelitales y contrastar las medidas puntuales hechas por estaciones meteorológicas y otros tipos de sondas.

Cabe afirmar también que los detectores CRND son sensibles no solamente a la humedad del suelo, sino también a concentraciones de agua en la superficie, como puede ser nieve, concentraciones de agua y biomasa. Con un adecuado análisis de datos, estos

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



sistemas podrían utilizarse para mejorar modelos de predicción meteorológica, sobre todo con un enfoque de estudio de fenómenos climáticos extremos (como las sequías e inundaciones) y los ciclos de carbón y su relación con el agua. También pueden resultar útiles en el monitoreo de glaciares y cuencas hídricas.

Tecnologías en detectores de neutrones cósmicos

Los detectores de neutrones cósmicos (CRNS) utilizados en la red COSMOS emplean tubos llenos de gas Helio-3 (^{3}He) como medio de detección. Estos tubos funcionan como detectores gaseosos que operan a alto voltaje para facilitar la detección de neutrones térmicos. Cuando los neutrones cósmicos secundarios alcanzan la superficie terrestre, parte de ellos es moderada por el hidrógeno presente en el suelo, y una fracción se convierte en neutrones térmicos. Estos neutrones térmicos pueden ser capturados por los núcleos de helio-3, generando una reacción nuclear que produce partículas cargadas (protones y tritones). Estas partículas ionizan el gas, generando impulsos eléctricos que son amplificados y procesados por un sistema de adquisición de datos. El conteo de estos impulsos está inversamente correlacionado con el contenido de hidrógeno en el suelo, lo que permite inferir su humedad volumétrica.

El Helio-3 es un isótopo poco común y su disponibilidad es limitada en la Tierra. Se forma de manera natural como producto de la desintegración radiactiva de tritio, que es un isótopo del hidrógeno. El tritio se genera en reactores nucleares como subproducto de la fisión nuclear y también puede producirse artificialmente en reactores nucleares o aceleradores de partículas. Una vez que se produce el tritio, este puede desintegrarse radiactivamente para formar helio-3. Sin embargo, la cantidad de helio-3 producido de esta manera es generalmente baja en comparación con otras fuentes de helio-3, como la captura en la atmósfera solar o la extracción de gas natural. Este hecho hace que los detectores de neutrones basados en He-3 sean costosos por lo que no representan una posibilidad para monitorear la humedad de campos agrícolas.

Los detectores de neutrones basados en plásticos centelladores son dispositivos que utilizan materiales plásticos especiales, llamados centelladores, para detectar la presencia de neutrones. Estos detectores son una opción común en muchas aplicaciones debido a su sensibilidad, bajo costo y versatilidad [16].

El funcionamiento de estos detectores se basa en el principio de que cuando un neutrón interactúa con el centellador plástico, puede transferir parte de su energía al material. Esta interacción provoca la excitación de los átomos en el centellador, que luego emiten luz (centelleo) como respuesta a la energía absorbida. Esta luz emitida puede ser detectada por un tubo fotomultiplicador (PMT) o un fotomultiplicador de Silicio (SiPM), que convierten la señal de luz en una señal eléctrica que puede ser registrada y analizada.

Los detectores de neutrones basados en plásticos centelladores pueden tener diferentes formas y tamaños dependiendo de la aplicación específica. Se utilizan en una amplia gama de campos, incluyendo la investigación nuclear, la detección de material nuclear, la vigilancia de radiación en entornos nucleares, la monitorización de la radiación en la industria, la medicina nuclear, la detección de explosivos y la exploración de recursos naturales.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



Una de las ventajas clave de estos detectores es su capacidad para discriminar entre neutrones y otras partículas cargadas, como los rayos gamma, lo que les permite proporcionar mediciones precisas de la radiación neutrónica en presencia de otras fuentes de radiación. Además, son dispositivos robustos y portátiles, lo que los hace adecuados para una variedad de aplicaciones en terreno.

Utilizando plásticos centelladores y SiPMs es posible construir CRNDs con un modesto presupuesto (en torno a los 4K USD), los cuales pueden llegar a tener iguales o mayores prestaciones que los CRNDs gaseosos [17, 18].

Las técnicas de detección, los sistemas de adquisición y análisis de datos de los CRNDs son similares a las utilizadas en la detección de rayos cósmicos, disciplina en la cual muchos investigadores del país y de la región tienen extensa experiencia. Para citar un ejemplo, tenemos a la colaboración LAGO (Latin American Giant Observatory), que desde hace más de una década está formando investigadores y desarrollando sistemas de detección de rayos cósmicos para el proyecto LAGO [19].

Aplicaciones en la región

La implementación de una red de detectores de humedad del suelo representa una necesidad urgente para la región andina si se quiere enfrentar de manera efectiva los efectos del cambio climático sobre la agricultura. Tal como se evidencia en los hallazgos de este estudio, actualmente no existen redes de sensores activas en Ecuador ni en los Andes tropicales que permitan un monitoreo sistemático de la humedad del suelo y la atmósfera. Esta ausencia de infraestructura tecnológica constituye una clara oportunidad para el impulso de la investigación, el desarrollo científico y la innovación tecnológica en nuestro entorno. Se abre una puerta concreta para que Ecuador lidere iniciativas de desarrollo en ciencia aplicada a la gestión hídrica y climática. Las aplicaciones de los CRNDs en la región pueden cubrir diversas áreas estratégicas:

- **Agricultura de precisión:** Los CRNDs permiten la implementación de sistemas de riego inteligente, optimizando el uso del agua y mejorando la productividad de los cultivos sin comprometer la sostenibilidad del recurso hídrico.

- **Conservación ambiental:** Estos sensores pueden integrarse en redes de monitoreo continuo de glaciares y ecosistemas altoandinos como los páramos, que cumplen funciones críticas de regulación y almacenamiento hídrico.

- **Gestión de riesgos y seguridad:** Los CRNDs también pueden emplearse para monitorear cambios en la humedad de suelos en quebradas, lechos de ríos y acueductos, proporcionando información clave para sistemas de alerta temprana ante inundaciones, sequías y deslizamientos o aluviones.

Además, esta tecnología representa una alternativa viable desde el punto de vista financiero. La inversión necesaria para su implementación es moderada en comparación con otras tecnologías de monitoreo ambiental, y su diseño puede ser escalado localmente. Su carácter autónomo permite que estos sistemas funcionen sin depender directamente de grandes organismos internacionales o estructuras gubernamentales complejas, facilitando su adopción a nivel comunitario.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



La iniciativa también ofrece beneficios a largo plazo en términos de rentabilidad del sector agropecuario y seguridad para quienes trabajan en entornos rurales. El desarrollo de prototipos locales —capaces de registrar flujos de neutrones y astropartículas en el tiempo, procesar los datos y generar estimaciones precisas de humedad sobre hectáreas de terreno— es factible gracias al conocimiento acumulado en los institutos de investigación latinoamericanos. Además, el uso de plataformas abiertas para el almacenamiento de datos crudos y procesados fomentaría la colaboración científica y el acceso libre a la información en todo el continente.

América latina y la agricultura de precisión

El rápido aumento de la población mundial demanda una producción alimentaria adecuada en términos de cantidad y calidad, a precios accesibles y con un mínimo impacto ambiental.

En contraste con la agricultura convencional, que trata el terreno de manera uniforme y utiliza la misma cantidad de insumos en toda la superficie de cultivo, la Agricultura de Precisión (AP) se distingue por su capacidad para gestionar la variabilidad espacial y temporal del terreno y del cultivo [20]. Esto implica la aplicación diferenciada de insumos, teniendo en cuenta las características del suelo (como textura, acidez, humedad, topografía), el desarrollo de las plantas y las condiciones específicas entre las temporadas de siembra.

Este enfoque agrícola se estructura en tres fases: recopilación de datos, análisis de información e implementación de las técnicas más apropiadas. Se apoya en cinco tecnologías principales, que incluyen sistemas de posicionamiento e información geográfica (GPS y GIS), sensores remotos, maquinaria automatizada y monitores de rendimiento y aplicación.

Para que un país pueda adoptar con éxito este modelo agrícola, es necesario contar con tres condiciones fundamentales: instituciones especializadas que generen conocimiento y formen recursos humanos, sistemas eficaces de recolección de información y una gestión precisa de los recursos agronómicos mediante sistemas de toma de decisiones adecuados. Los sistemas de determinación de la humedad del suelo junto con sensores ambientales y estudios fisicoquímicos del suelo pueden ser la base para la creación de un gran sistema de información que permita desarrollar técnicas sofisticadas de cultivo, crecimiento y cosecha de productos agrícolas.

La inteligencia artificial (IA) se puede integrar de diversas formas en la agricultura de precisión para optimizar la producción agrícola. Aquí hay algunas formas en que se puede utilizar:

1. **Análisis de datos:** la IA puede procesar grandes cantidades de datos recopilados de diversas fuentes, como imágenes satelitales, drones, sensores en el campo y datos meteorológicos. Algoritmos de IA pueden analizar estos datos para identificar patrones, tendencias y anomalías que pueden ser útiles para la toma de decisiones agrícolas.

2. **Predicción de cosechas:** mediante el análisis histórico de datos agrícolas y condiciones ambientales, la IA puede predecir rendimientos de cosechas futuras.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



Esto ayuda a los agricultores a planificar de manera más efectiva sus actividades agrícolas, desde la siembra hasta la cosecha.

3. **Gestión de cultivos:** los sistemas de IA pueden monitorear continuamente el crecimiento de los cultivos utilizando imágenes de satélite o drones. Con algoritmos de aprendizaje automático, pueden identificar áreas que requieren atención especial, como la detección de enfermedades, estrés hídrico o deficiencias nutricionales.

4. **Optimización de insumos:** la IA puede ayudar a los agricultores a optimizar el uso de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas. Al analizar datos sobre las condiciones del suelo, el clima y el crecimiento de los cultivos, los algoritmos de IA pueden recomendar la cantidad adecuada de insumos en cada área del campo, reduciendo así el desperdicio y los costos.

5. **Sistemas de control autónomo:** la IA puede integrarse en equipos agrícolas autónomos, como tractores y rociadores, para realizar tareas específicas en el campo de manera precisa y eficiente. Estos sistemas pueden adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del terreno y responder en tiempo real a los datos recopilados por sensores.

CONCLUSIONES

Las estrategias y métodos de riego utilizados por los agricultores de Ecuador se basan en técnicas tradicionales que son ineficientes e inadecuadas desde el punto de vista de la optimización de recursos hídricos. Esto constituye un factor negativo a nivel productivo porque no se logra maximizar la producción agrícola del suelo.

La introducción de tecnología en actividades agrícolas, en especial el desarrollo de redes de sensores para la medida y monitoreo constante del nivel de humedad relativa del suelo, servirá para el desarrollo de sistemas de riego inteligente que puedan procesar datos en tiempo real y determinar la cantidad óptima de agua para irrigación.

El avance de la investigación y tecnología en la detección de partículas se hace asequible desde el punto de vista de conocimiento y de inversión para la implementación de una red regional de monitoreo de la humedad del suelo. El monitoreo de la humedad del suelo puede ser usado para el desarrollo de técnicas de optimización del uso del agua de riego y otros recursos (agronomía de precisión) que permitan el ahorro de recursos y el aumento de la producción, el estudio de ciclos de carbón para combatir el cambio climático (determinación del cambio en el nivel de biomasa del terreno) y el aumento en la exactitud de las previsiones meteorológicas, en especial en la predicción de sequías o inundaciones.

La implementación de técnicas de AP en nuestra región debe iniciar por la creación y desarrollo de una red de sensores ambientales y de caracterización del suelo que generen información consistente en el tiempo y en el espacio. Esta información debe ser pública para que diversos grupos de investigación los puedan analizar.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299



La IA ofrece una variedad de herramientas y técnicas que pueden mejorar la agricultura de precisión al proporcionar análisis avanzados, predicciones precisas y decisiones automatizadas basadas en datos en tiempo real. Esto permite a los agricultores optimizar la producción, reducir costos y minimizar el impacto ambiental.

Todo esfuerzo que se encamine a la integración de nuestra región a través del desarrollo de proyectos conjuntos encaminados a resolver problemas comunes debe ser tomado en consideración y apoyado por las instituciones que se encargan de la toma de decisiones y la implementación de políticas de estado.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Los autores contribuyeron en todas las etapas de elaboración del presente artículo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con los contenidos de esta investigación.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.3299

aci avances en ciencias e ingenierías

REFERENCIAS

[1] Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A., Holzkämper, A., Kersebaum, K.-C., Kozyra, J., Kriaučiūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Potopová, V., Ruiz-Ramos, M., Reidsma, P., Rijk, B., Trnka, M., van Ittersum, M. K., & Olesen, J. E. (2022). Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy, 138*, 126516. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516.

[2] Ortiz-Bobea, A., Ault, T. R., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change, 11*(4), 306–312. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1

[3] International Atomic Energy Agency. (2015). *ARCAL - Regional Strategic Profile for Latin America and the Caribbean (RSP) 2016–2021* (IAEA-TECDOC--1763(S)). International Atomic Energy Agency. https://www.iaea.org/

[4] Sharp, R. E., & Davies, W. J. (1985). Root growth and water uptake by maize plants in drying soil. *Journal of Experimental Botany, 36*(9), 1441–1456. https://doi.org/10.1093/jxb/36.9.1441

[5] Chukalla, A. D., Krol, M. S., & Hoekstra, A. Y. (2015). Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: Effect of irrigation techniques, irrigation strategies, and mulching. *Hydrology and Earth System Sciences, 19*(12), 4877–4891. https://doi.org/10.5194/hess-19-4877-2015

[6] Lema Mancero, C. R. (2022). *Eficiencia de aplicación de tres métodos de riego en el cultivo de maíz (Zea mays L.) variedad INIAP-101* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16550

[7] Gago, J., Douthe, C., Florez-Sarasa, I., Escalona, J. M., Galmés, J., Fernie, A. R., Flexas, J., & Medrano, H. (2014). Opportunities for improving leaf water use efficiency under climate change conditions. *Plant Science, 226,* 108–119. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.04.007

[8] UNESCO. (2021). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021: El valor del agua; datos y cifras* (SC-2021/WS/3). WWAP. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_spa

[9] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2020). *Información agroambiental y tecnificación agropecuaria, módulo ESPAC 2018.* https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Modulo_Ambiental_ESPAC_2018/RESULT_MOD_AMB_ESPAC_2018.pdf

[10] Banco Mundial. (14 de julio de 2021). En Ecuador, el riego tecnificado equivale a cultivos más sostenibles y mejor alimentación. *World Bank*. https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2021/07/14/en-ecuador-el-riego-tecnificado-equivale-a-cultivos-m-s-sostenibles-y-mejor-alimentaci-n

[11] Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., Escorihuela, M. J., Font, J., Reul, N., Gruhier, C., Juglea, S. E., Drinkwater, M. R., Hahne, A., Martín-Neira, M., & Mecklenburg, S. (2010). The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proceedings of the IEEE, 98*(5), 666–687. https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032

[12] Singh, A., & Gaurav, K. (2023). Deep learning and data fusion to estimate surface soil moisture from multi-sensor satellite images. *Scientific Reports, 13*(1), 2251. https://doi.org/10.1038/s41598-023-28939-9

[13] Wallbank, J. R., Cole, S. J., Moore, R. J., Anderson, S. R., & Mellor, E. J. (2021). Estimating snow water equivalent using cosmic-ray neutron sensors from the COSMOS-UK network. *Hydrological Processes, 35*(5), e14048. https://doi.org/10.1002/hyp.14048

[14] Andreasen, M., Jensen, K. H., Desilets, D., Franz, T. E., Zreda, M., Bogena, H. R., & Looms, M. C. (2017). Status and perspectives on the cosmic-ray neutron method for soil moisture estimation and other environmental science applications. *Vadose Zone Journal, 16*(8). https://doi.org/10.2136/vzj2017.04.0086

[15] Köhli, M., Schrön, M., Zacharias, S., & Schmidt, U. (2023). URANOS v1.0 – the Ultra Rapid Adaptable Neutron-Only Simulation for Environmental Research. *Geoscientific Model Development, 16*(2), 449–477. https://doi.org/10.5194/gmd-16-449-2023

[16] Stoykov, A., Mosset, J. B., Greuter, U., Hildebrandt, M., & Schlumpf, N. (2015). A SiPM-based ZnS:6LiF scintillation neutron detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 787*, 361–366. https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.01.076



[17] Bodini, I., Paderno, D., Pagano, D., Donzella, A., Bonomi, G., Zenoni, A., & Villa, V. (2022). Design Requirements Assessment in the COMMAND (Compact Multi-purpose Muon and Neutron Detector) Project. En S. Gerbino, A. Lanzotti, M. Martorelli, R. Mirálbes Buil, C. Rizzi, & L. Roucoules (Eds.), *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing IV* (pp. 367–379). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15928-2_32

[18] Stevanato, L., Baroni, G., Cohen, Y., Fontana, C. L., Gatto, S., Lunardon, M., Marinello, F., Moretto, S., & Morselli, L. (2019). A novel cosmic-ray neutron sensor for soil moisture estimation over large areas. *Agriculture, 9*(9), 202. https://doi.org/10.3390/agriculture9090202

[19] Asorey, H., Núñez, L. A., Suárez-Durán, M., Torres-Niño, L. A., Rodríguez-Pascual, M., Rubio-Montero, A. J., & Mayo-García, R. (2016). *The Latin American Giant Observatory: A successful collaboration in Latin America based on cosmic rays and computer science domains. In 2016 IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid)* (pp. 707–713). IEEE. https://doi.org/10.1109/CCGrid.2016.110

[20] Santillán, O. (2018). *Agricultura de precisión* (p. 15). Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión (INCyTU). https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_18-015.pdf